



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**STANOVENÍ PRODUKCE BIOPLYNU V BIOPLYNOVÉ
STANICI**

ESTIMATION OF BIOGAS PRODUCTION IN BIOGAS PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Heger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Touš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Jan Heger**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Touš, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Stanovení produkce bioplynu v bioplynové stanici

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bioplynové stanice (BPS) jsou plně obnovitelnými zdroji energie, které naplňují koncepci tzv. „cirkulární ekonomiky“, jež udržuje funkční a zdravé vztahy mezi přírodou a lidskou společností. BPS zpracovávají odpady přírodního původu a produkují elektřinu, teplo a hnojivé látky, které lze využít jako náhradu za syntetická hnojiva. Investice do nových BPS je nicméně stále poměrně nákladná a neobejde se bez státní podpory. Zavedení nových technologií a postupů by mohlo tuto situaci změnit a přispět k dalšímu rozšíření BPS.

Nabízené téma bakalářské práce je rešeršního charakteru. Práce je vhodná zejména pro studenty, kteří se chtějí seznámit s nejmodernějšími postupy a technologiemi spojenými s provozem bioplynových stanic. Důraz by měl být kladen na snižování energetické náročnosti a finančních nákladů s provozem spojených.

Cíle bakalářské práce:

1. Představení procesu anaerobního rozkladu organických látek ve fermentorech bioplynových stanic.
2. Zhodnocení klíčových faktorů, které proces ovlivňují a popis výpočtových metod pro stanovení produkce bioplynu.
3. Popis technologie konkrétní vybrané bioplynové stanice v ČR a definice nejčastěji používaného substrátu.
4. Výpočet teoretické produkce bioplynu z tohoto substrátu a porovnání s naměřenými daty v dané bioplynové stanici.

Seznam doporučené literatury:

ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn [online]. Czech Biogas Association. 2014. Dostupné z: http://www.czba.cz/files/ceska-biopl原因ova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_2014_FINAL.pdf

RUTZ, Dominik, Rita MERGNER a Rainer JANSSEN. Sustainable Heat Use of Biogas Plants: a Handbook [online]. 2. Munchen: WIP Renewable Energies, 2012 [cit. 2018-10-26]. ISBN 978--936338-35-5. Dostupné z: http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2015/03/Handbook-2ed_2015-02-20-cleanversion.pdf

STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. Bioplyn: příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha: GAS, 2006, 706 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7328-0-0-6.

PROCHÁZKA, Jindřich a Michal DOHÁNYOS. POROVNÁNÍ METOD PRO ODHAD PRODUKCE BIOPLYNU Z ROSTLINNÝCH SUBSTRÁTŮ. Paliva. 2011, 2011(3), 47-52. ISSN 1804-2058.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Zaměřením této práce jsou výpočtové metody pro odhad výtěžnosti bioplynu v bioplynové stanici. Cílem je seznámení s výpočtovými metodami a určení jejich přesnosti provedené výpočtem. Zpřesňování odhadu produkce bioplynu může být užitečné pro potřeby případových studií, studií proveditelnosti nebo při technicko–ekonomickém hodnocení. Dostupné výpočtové metody jsou ověřovány na případové studii, kde je využitím rozšířené Buswellovy metody a tabelovaných hodnot provedeno srovnání s provozními daty naměřených v bioplynové stanici ve Valašském Meziříčí. Srovnáním na této případové studii bylo dosaženo výsledku, kde výpočet Buswellovou metodou dosáhl velmi přesných hodnot, kdežto výpočet tabelovanými hodnotami se od porovnávaných naměřených hodnot lišil více a metoda dosáhla méně přesného výsledku.

Klíčová slova

bioplyn, bioplynová stanice, Buswellova metoda, substrát

Abstract

The focus of this thesis are calculation methods for biogas yield estimation in biogas plant. The aim is to get acquainted with calculation methods and to determine their accuracy by calculation. Refining biogas production estimates can be useful for case studies, feasibility studies, or technical-economic assessments. The available calculation methods are tested on a case study where a comparison with the operational data measured in the biogas plant in Valašské Meziříčí is accomplished using the extended Buswell method and tabulated values. Comparing this case study, a result was obtained where the calculation by the Buswell method reached very accurate values, whereas the calculation by tabulated values differed more from the measured values and the method achieved a less accurate result.

Keywords

biogas, biogas plant, Buswell method, substrate

Bibliografická citace

HEGER, J. *Stanovení produkce bioplynu v bioplynové stanici*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Touš, Ph.D

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Touše, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....
Jan Heger

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Michalu Toušovi, Ph.D., za odborné vedení, trpělivost a čas, který mi věnoval. Děkuji také Ing. Vladimíru Brummerovi, Ph.D., za provedení palivářských rozborů kukuřičné siláže a travní senáže. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Martinu Hajdovi z bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí za umožnění prohlídky bioplynové stanice, za ochotnou spolupráci a poskytnutí potřebných podkladů pro uskutečnění této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu.

Obsah

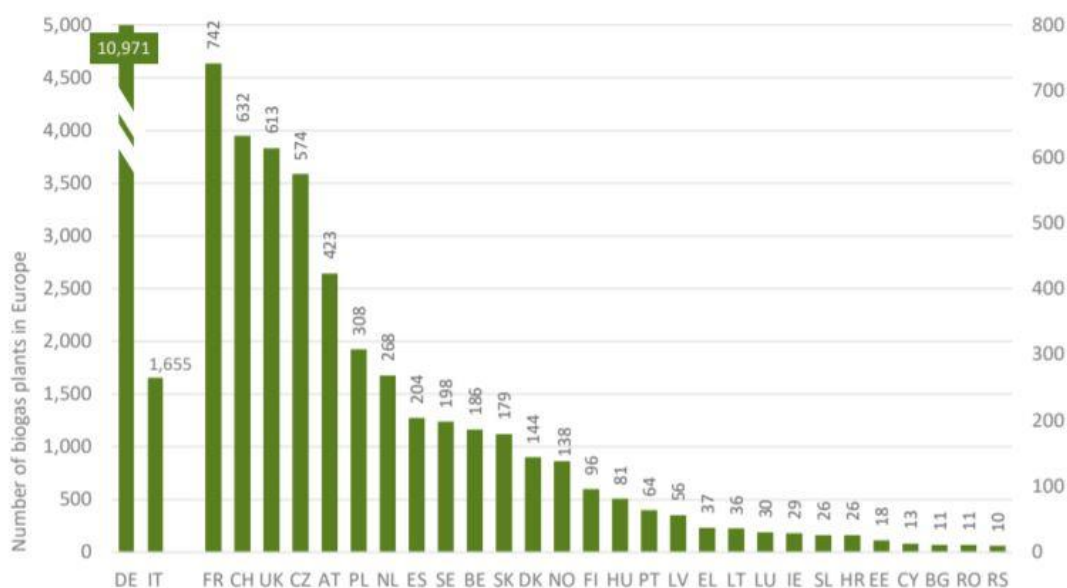
Úvod	13
1 Vznik bioplynu v bioplynové stanici	15
1.1 Substráty	15
1.2 Anaerobní fermentace	16
1.3 Vzniklé produkty	17
1.4 Využití bioplynu	18
1.5 Bioplynové technologie	19
1.5.1 Rozdělení dle obsahu sušiny	19
1.5.2 Způsob plnění	19
1.6 Jednotlivé části bioplynové stanice	20
1.6.1 Přípravné a skladovací nádrže	21
1.6.2 Fermentory	22
1.6.3 Kogenerační jednotka	22
1.6.4 Další zařízení	22
2 Popis výpočtových metod pro stanovení bioplynu	23
2.1 Buswellova metoda	23
2.2 CHSK	25
2.3 MEVM	27
2.4 Výpočet podle tabelovaných hodnot	28
3 Případová studie	29
3.1 Popis BPS Valašské Meziříčí	29
3.1.1 Technický popis	29
3.1.2 Zpracovávané suroviny	31
3.1.3 Výstupy z technologie	32
3.2 Výpočet odhadu produkce bioplynu	32
3.2.1 Výpočet Buswellovou metodou	32
3.2.2 Výpočet tabelovanými hodnotami	34
3.3 Srovnání s fermentačními testy	34
3.4 Srovnání s provozními daty	36
4 Závěr	39
Seznam použitých zdrojů	41
Seznam zkratk a symbolů	43
Seznam obrázků	44
Seznam tabulek	45

Úvod

V posledních letech stále více roste zájem o obnovitelné zdroje energie. Mezi obnovitelné zdroje energie lze například zařadit využití energie větru, vody, slunečního záření, biomasy nebo bioplynu. Využívají se především z důvodu snižování emisí skleníkových plynů a znečišťování, díky tomu pro nás mají velký význam především do budoucnosti. Využití obnovitelných zdrojů v České republice posledních pár let stagnuje, i přesto došlo v posledním desetiletí ke značnému nárůstu jeho využití a má potenciál k jeho rozšíření do budoucnosti [1].

Velkou perspektivu má využití bioplynu. K jeho vzniku dochází v bioplynových stanicích procesem anaerobní fermentace organických materiálů. Bioplyn se poprvé začal vyrábět již na přelomu 19. a 20. století. Avšak k většímu rozmachu došlo až v druhé polovině 20. století. První bioplynová stanice v České republice byla spuštěna v roce 1974 v Třeboni, která je stále v provozu. Během posledních 17 let došlo k významnému pokroku v rozvoji bioplynových stanic. V roce 2002 bylo na našem území pouze 11 stanic o výkonu 4,19 MW. Dnes je u nás již 574 stanic o výkonu 366 MW [2].

K poslednímu uvedenému statistickému shrnutí Evropské bioplynové asociace bylo ke konci roku 2017 v Evropě 17 783 bioplynových stanic. Oproti předešlému roku došlo k 2% nárůstu [3]. Nejvyspělejší zemí Evropy v tomto ohledu je Německo, ve kterém se nachází 10 971 bioplynových stanic. Česká republika je 6. v počtu bioplynových stanic v provozu, před ní je pouze zmiňované Německo, Itálie, Francie, Chorvatsko a Velká Británie. Pouze těchto 6 zemí provozuje nad 500 stanic [3].



Obr. 0-1 Počet bioplynových stanic v evropských státech [3]

Pro potřeby technicko-ekonomických studií týkajících se bioplynových stanic je důležitý odhad produkce bioplynu. Odhady produkce bioplynu jsou užitečné v případech, kdy je potřeba rychlého a snadného výpočtu, při kterém není nutná naprostá přesnost. Jelikož vyhodnocování laboratorních analýz trvá určitou dobu, jeví se výpočtové metody pro odhad produkce bioplynu jako vhodný způsob. Proces anaerobní fermentace je složitý, a proto je získávání přesných výsledků odhadu produkce bioplynu velmi obtížné.

I když již delší dobu existují metody, které tuto problematiku řeší, současná literatura se tímto tématem stále zabývá, protože se snaží stále více zvyšovat jejich přesnost. Zkoumáním zvyšování přesnosti metod a jejich porovnávání se zabývají například studie [4], [5] a [6].

V práci tedy budou některé výpočtové metody představeny. Jednotlivé metody požadují různé vstupní parametry nezbytné k výpočtu. Z představených metod budou vybrány vhodné metody, kterými bude provedení výpočtu rychlé a jednoduché. Vybrané metody budou otestovány, jak si obstojí při aplikaci na existující bioplynovou stanici. Vypočítaná data budou srovnána s provozními daty naměřenými ve vybrané bioplynové stanici. Bude stanoveno vyhodnocení přesnosti využitých metod na dané případové studii. Výsledky získané touto prací mohou být užitečné pro získání přehledu o způsobech zjišťování odhadu produkce bioplynu a využití při dalších testování na nových případových studiích

1 Vznik bioplynu v bioplynové stanici

Bioplyn je produktem při anaerobní fermentaci, která je dále popsána v kapitole 1.2, je to směs plynů, z největší části tvořena methanem a oxidem uhličitým. Bioplynové stanice jsou zařízení, ve kterých dochází k přeměně biomasy na bioplyn. Materiály, které se zpracovávají díky svým vlastnostem a složení v bioplynové stanici se nazývají substráty.

Bioplynové stanice se rozdělují do 3 základních kategorií dle zpracované biomasy [2]:

- Zemědělské – zpracovávají pouze substráty ze zemědělské prvovýroby, především plodiny cíleně pěstované k energetickému využití a statková hnojiva.
- Komunální – zpracovávají se komunální bioodpady, odpady z domácností a jídelen, prošlé potraviny, komunální zeleně.
- Průmyslové – zpracovávají se výhradně, anebo podílově rizikové substráty jako jsou jateční odpady a kaly z čističek odpadních vod.

1.1 Substráty

Substrát je vstupní materiál bioplynové stanice, který je surovinou v biochemickém procesu anaerobní fermentace. Pokud je převážná část substrátu v rozpuštěné formě, lze mluvit o odpadní vodě a pokud je většina substrátu ve formě suspenze tuhých látek ve vodě, nazývá se surovým kalem [7]. Využívané substráty se mohou lišit v každé bioplynové stanici. Každý materiál vyprodukuje jiné množství bioplynu. Nejčastěji se zpracovávají výstupy z chovu hospodářských zvířat (keřda, hnůj), cíleně pěstované biomasy (kukuřice, senáž), bioodpady z podnikatelských provozů, bioodpady z domácností, prošlé potraviny a bioodpady z obchodů. Pro zajištění dostatečného množství zpracovávaných materiálů je vhodně umístit bioplynovou stanici do oblasti umožňující zajistit tyto materiály. Při výběru biomasy je důležité, aby se v úvahu braly tyto body [8]:

- Obsah organických látek by měl být vhodný pro zvolený fermentační proces.
- Výživová hodnota organické látky, tedy potenciál pro tvorbu plynu, by měl být co nejvyšší.
- Substrát by neměl obsahovat patogeny a jiné organismy, které by bylo potřeba udělat neškodnými před procesem fermentace.
- Obsah škodlivých látek a odpadků by měl být nízký, aby proces fermentace probíhal hladce.
- Složení bioplynu by mělo být vhodné pro další použití.
- Složení fermentačního zbytku by mělo být takové, že se může dále použít například jako hnojivo.

Aby mohl být materiál zpracován při anaerobní fermentaci, musí splňovat určité podmínky [9]:

- Optimální obsah sušiny pro zpracování tuhých materiálů je 22–25 % a pro zpracování tekutých materiálů je 8–14 %. K pozitivní energetické bilanci dojde až při sušině tekutých materiálů vyšších než 3–5 %.
- Důležitým faktorem je hodnota pH, která je optimální v intervalu neutrální hodnoty 7–7,8.
- Poměr uhlíku a dusíku by měl činit 20:1 až 40:1.
- Nepřítomnost nežádoucích příměsí, které by mohly narušit proces anaerobní fermentace. Nežádoucími příměsemi mohou být látky potlačující mikrobiální rozvoj, např. antibiotika.
- Materiál by neměl být dlouhodobě skladován.

Pokud materiál nesplňuje požadované podmínky, může být zpracován aerobní fermentací.

Proteiny, lipidy a sacharidy jsou základy substrátů pro produkci bioplynu. Z tabulky 1-1 lze vidět, že výtěžky bioplynu a nalézaného obsahu methanu jsou nejvyšší u lipidů. Je zde ale problém při rozkladu tuků, při kterém kvůli jejich vlastnostem může docházet k zvyšování tvorby pěny, vyplouvání ke hladině nebo oddělování vodné fáze [7].

Tabulka 1-1 Produktivita různých substrátů v procesu anaerobní fermentace [7].

Substrátová skupina	Produkce bioplynu [m ³ /kg rozložené sušiny]	Obsah methanu prakticky nalézaný
		[% obj.]
polysacharidy a jednoduché cukry	0,75–0,90	50–58
proteiny	0,60–0,80	65–75
lipidy	1,10–1,60	70–85

1.2 Anaerobní fermentace

Následující část je převzata ze zdroje [7]. Ke vzniku bioplynu dochází biologickým procesem nazývaným anaerobní fermentace. Během ní dochází k několika na sebe navazujících procesů, které bez přístupu vzduchu rozkládají organické materiály pomocí mikroorganismů. Důležitý je výchozí materiál, který musí obsahovat polysacharidy, bílkoviny, tuky. Společně s bioplynem je produktem také digestát. Celý proces lze rozdělit na 4 fáze: hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze, methanogeneze. Při hydrolýze dochází anaerobními bakteriemi k rozložení výchozích materiálů na jednodušší organické sloučeniny, kterými jsou např. aminokyseliny, monosacharidy nebo mastné kyseliny. Produkty hydrolýzy se následně rozkládají při acidogenezi pomocí acidogenních bakterií na jednoduché organické látky, především na nižší mastné kyseliny, alkoholy, CO₂ a H₂. V závislosti na podmínkách prostředí a na substrátu zde dochází fermentací ke vzniku řady konečných produktů. Při nízkém parciálním tlaku vodíku jsou produkovány kyselina octová, CO₂ a H₂. Při vyšším parciálním tlaku vodíku jsou tvořeny vyšší organické kyseliny, kyselina mléčná a ethanol. Při acetogenezi jsou z produktů předešlé fáze oxidací tvořeny kyseliny octové, vodíku a CO₂ acetogenními bakteriemi, které produkují vodík. Nakonec v poslední fázi dochází k tvorbě methanu spolu s vodou a CO₂ pomocí methanových bakterií v alkalickém prostředí. Methanové bakterie jsou citlivé na změny teplot, pH, oxidačních potenciálů a dalších inhibičních vlivů.

Existuje několik druhů methanových bakterií a k jejich funkci musí být splněno několik životních podmínek [10]:

- Vlhké prostředí – pracují a množí se pouze tehdy, když jsou dostatečně zality vodou.
- Zabránění přístupu vzduchu.
- Zabránění přístupu světla.
- Stálá teplota – pracují při teplotě mezi 0 °C až 70 °C.
- Hodnota pH – hodnota pH by měla být okolo 7,5.
- Přísun živin – je potřeba rozpustných dusíkatých sloučenin, minerálních látek a stopových prvků pro svou buněčnou stavbu.
- Rovnoměrný přísun substrátu.
- Odplynování substrátu.

Ve většině bioplynových stanic dochází ke kontinuálnímu plnění organickou hmotou a díky tomu mohou jednotlivé fáze anaerobní fermentace fungovat současně.

Proces fermentace se dělí podle optimální teploty pro mikroorganismy, tak aby mohly rychleji rozkládat materiál na psychrofilní – méně než 25 °C, mezofilní – 25 až 45 °C, a termofilní – 45 až 75 °C [7].

Průběh procesu může být ovlivněn a přerušen několika různými vlivy:

- Teplota – K poklesu teploty může dojít řadou situací. Při celém procesu je důležitá regulace a neustálý provoz kogenerační jednotky, díky které dochází k vytápění fermentoru. V případě odstavení kogenerační jednotky je potřeba zajistit náhradu, jinak by došlo k poklesu teploty a inhibici methanogenních bakterií, které přežívají pouze v úzkém teplotním rozmezí [10].
- Vznik amoniaku NH_3 – Má nežádoucí vliv na celý proces. K jeho působení dochází za vysokých hodnot pH. Na vznik amoniaku působí volba substrátu. Pokud má substrát vysoký obsah bílkovin, dochází při fermentaci k jeho uvolnění ve větším množství [11].
- Sulfan H_2S – Je nežádoucí složkou, ale v malém množství se sulfan vyskytuje v každém bioplynu. Vzniká degradací silných sloučenin obsažených ve zpracovávaném bioodpadu. Jeho obsah je závislý na složení použitého substrátu a technologii. Je nežádoucí z důvodu jeho korozivních účinků. Proto je vhodné bioplyn spalovaný v kogeneračních jednotkách před spálením zbavit sulfanu a ostatních sirných látek [12].
- Chyby při dávkování substrátu – U nově postavených zařízení může docházet už v počáteční fázi k nízké výrobě plynu nebo k příliš vysoké koncentraci kyseliny, což může vést ke kompletní výměně obsahu reaktoru [10].
- Naplňování fermentoru – Je důležité, aby množství substrátu bylo zvyšováno pomalu po malých krocích, aby měly methanové bakterie dostatek času pro růst. Pokud by došlo k přidání vysokého množství substrátu najednou, mohlo by dojít ke zkyselení celého procesu [10]. Způsoby plnění substrátu jsou popsány v kapitole 1.5.2.

1.3 Vzniklé produkty

Z údajů o použitých substrátech lze určit kolik bioplynu se v bioplynové stanici vyrobí. Kvůli neznámým koncentracím jednotlivých látek je přesný odhad výtěžku obtížný. Podle složení bílkovin, tuků a sacharidů může být výpočtem stanovený odhadnutý výtěžek. Vzniklý bioplyn je z převažujícího množství složený z methanu a oxidu uhličitého. V menším množství obsahuje vodní páry a rozličné stopové složky [13]. Přehled o průměrném složení bioplynu je uveden v tabulce 1-2.

Tabulka 1-2 Průměrné složení bioplynu [13]

Složka	Obsah
Methan (CH_4)	45–70 %
Oxid uhličitý (CO_2)	30–55 %
Vodík (H_2)	0–3 %
Sulfan (H_2S)	0,1–1 %
Dusík (N_2)	1–3 %
Kyslík (O_2)	0–2 %
Amoniak (NH_3)	<1 %

Pro zjištění kvality bioplynu je důležitý obsah methanu, z kterého vyplývá výsledek získávané energie. Obsah methanu závisí na několika faktorech, kterými jsou obsah vody v substrátu, fermentační teplota, doba zdržení a předpracování substrátu a jeho stupeň rozkladu. Podle použitého substrátu lze určit dosažitelný výtěžek methanu. Nejvyšší měrné výtěžnosti je dosahováno u tuků, dále u proteinů a nejméně sacharidů. Důležitý je také obsah sulfanu, který při vysoké koncentraci může způsobovat korozní škody na kogeneračních jednotkách. Z toho důvodu je dáván pozor, aby koncentrace nebyla příliš vysoká [10].

Zbytkovým produktem při anaerobní fermentaci je digestát. Digestát je zbytkem při fermentaci, který má převážně tekutou formu. Obsahuje velké množství živin a humusu, které se dále nerozkládají a nezapáchají. Díky jeho složení může být dále využíván. Jeho nejčastější využití je jako hnojivo na zemědělské půdě. Až 95 % digestátu vyprodukovaného v Evropě se používá jako hnojivo. Jeho využití je stejně jako u jakéhokoli jiného organického hnojiva regulováno pravidly pro aplikaci hnojiv dle předpisů členských států EU [14].

Jak už bylo zmíněno, může být využíván jako organické hnojivo, a to buď přímo v kapalné formě, obsahující 5 až 10 % sušiny, nebo je od sebe oddělen fugát a separát. Fugát je kapalná fáze s obsahem 2–4 % sušiny a je využíván jako tekuté hnojivo, anebo je skladován. Separát je jeho pevná fáze, která se využívá v zemědělství a zahradnictví. V Evropě je vykazována roční produkce ve výši přibližně 80 milionů tun digestátu z 13 tisíc bioplynových stanic [14].

1.4 Využití bioplynu

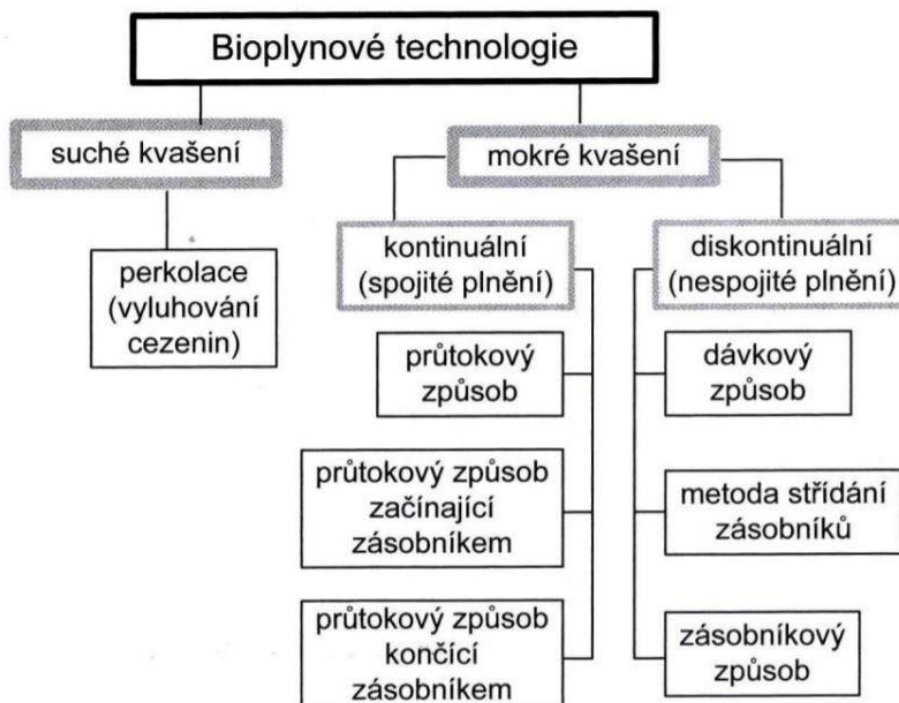
Bioplyn může být přeměněn na tepelnou, mechanickou energii a elektromagnetickou energii. Existuje mnoho různých možností pro využití bioplynu od malých aplikací až po technicky náročné instalace [15]:

- Osvětlení – v plynových svítlidlech.
- Teplo – u hořáků na bioplyn, kotlů a plynových sporáků.
- Sušení – různé typy sušáren.
- Chlazení – v absorpčních chladičích.
- Elektrina – v plynových motorech, v palivových člancích, mikroturbínách, Rankinových cyklech, Kalinových cyklech, Stirlingových motorech.
- Doprava – ve vozidlech na stlačený zemní plyn jako biomethan.
- Uchování energie – ve vyhrazených zásobnících bioplynu nebo jako biomethan v rozvodné síti zemního plynu za účelem vyvážení elektřiny a tepla.
- Náhrada zemního plynu – úprava na biomethan a následné vtlačení do rozvodné sítě pro zemní plyn.

Hlavním využitím bioplynu ve většině evropských bioplynových stanicích je kogenerace [15]. Kogenerace je společná výroba tepla a elektřiny. Před jeho spalováním je vyráběný bioplyn sušen a v mnoha případech čištěn, protože většina plynových motorů má maximální limity pro obsah sulfanu, halogenových uhlovodíků a siloxanů. Kogenerační jednotka má účinnost 90 % a vyrábí se z ní přibližně 35 % elektřiny a 65 % tepla. Ve většině stanic je potřeba menšího množství (20–40 %) vygenerovaného tepla pro vytápěcí systém a větší množství (60–80 %) je považováno za přebytečné teplo, které se dále nepoužívá. Pro další procesy. Toto teplo by mohlo být dále využito pro další výrobu elektřiny nebo pro jiné účely jako topení, chlazení nebo sušení [15].

1.5 Bioplynové technologie

Volba konkrétní technologie závisí na předpokládané skladbě substrátů, místních podmínkách, teplotním režimům fermentace apod. Z hlediska obsahu sušiny ve zpracovaném vstupním substrátu se dělí na mokrou a suchou fermentaci, dvě základní bioplynové technologie.



Obr. 1-1 Schématický přehled bioplynových technologií [16]

1.5.1 Rozdělení dle obsahu sušiny

Suchá fermentace

Při suché fermentaci dochází ke zpracování biomasy s obsahem sušiny nad 20 %. Hlavní výhodou je menší množství vyhnílého digestátu a menší spotřeba procesní vody na ředění a na to navazující problémy s jejím uplatněním na výstupu [7].

Mokrá fermentace

Při mokré fermentaci dochází ke zpracování biomasy s obsahem sušiny menším než 12 %. Tento způsob je nejrozšířenější a představuje odhadem 95 % všech instalací v ČR. Probíhá ve velkoobjemových uzavřených nádobách tzv. fermentorech [7].

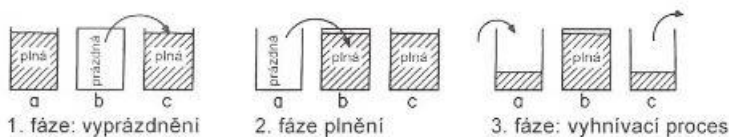
1.5.2 Způsob plnění

Mokrá fermentace se dále dělí podle způsobu plnění na kontinuální (spojité), které má typické použití u fermentorů typických pro zpracování tekutých organických odpadů s velmi malým obsahem sušiny, a na diskontinuální (nespojité) plnění, které probíhá s přerušovaným provozem a doba jednoho pracovního cyklu se rovná zdržné době materiálu ve fermentoru.

Dle Obr. 1-1 lze vidět, že do kontinuální plnění patří průtokový způsob, průtokový způsob začínající zásobníkem a průtokový způsob končící zásobníkem. Do diskontinuálního plnění se

řadí dávkový způsob, metoda střídání zásobníků a zásobníkový způsob. Na Obr. 1-2 lze vidět podrobnější popis daných metod plnění.

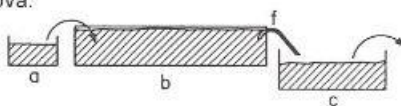
I Dávková metoda:



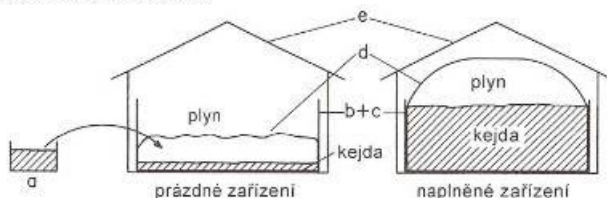
II Metoda střídání nádrží:



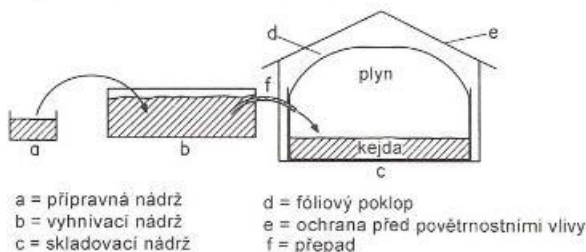
III Metoda průtoková:



IV Metoda se zásobníkem



V Metoda průtoková se zásobníkem na konci



Obr. 1-2 Způsoby dávkování substrátu [16]

Jednostupňový nebo vícešupňový proces

Vyhnívání substrátu a výroba bioplynu lze z hlediska techniky výrobního procesu provádět jednostupňově nebo vícešupňově. Jednostupňový proces, který se skládá ze 4 fází, které jsou popsány v kapitole 1.2, probíhá v jednom vyhnívacím prostoru u plně promíchávaných zařízení souběžně ve stejném čase i prostoru a u zařízení ve směru toku nepromíchávaných naproti tomu v různých prostorech jedna za druhou. Při vícešupňovém procesu dochází k oddělení vyhnívacích fází buď pomocí použití většího množství vyhnívacích nádrží, nebo oddělením ve vyhnívacím prostoru. Vícestupňový proces má vysoké náklady a z toho důvodu pro zemědělské bioplynové stanice může být využit pouze dvoustupňový postup [16].

1.6 Jednotlivé části bioplynové stanice

V této kapitole budou popsány některé z důležitých zařízení pro provoz bioplynové stanice. K dopravě substrátu se nejčastěji využívá potrubí, čerpadla nebo armatury. Existují dva druhy potrubí a to plnicí, kterým je pod tlakem čerpadla dopravován substrát do fermentoru

a přepadové porubí, kterým materiál odchází spádem. Čerpadla se využívají v případě potřeby překonání výškového rozdílu. Armatury umožňují možnost řízení toku. Nejdůležitějšími armaturami v potrubním systému jsou spojky, šoupátka, manometry, čistící otvory, zpětné klapky [16]. Schéma typické bioplynové stanice je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 1-3 Schéma bioplynové stanice [17]:

1 – sklad vstupní suroviny, 2 – dávkovací zařízení, 3 – fermentor, 4 – dofermentor, 5 – míchací zařízení, 6 – čerpadlo, 7 – nádrž na vyfermentovaný substrát, 8 – kogenerační jednotka, 9 – zásobník bioplynu, 10 – elektrická energie, 11 – tepelná energie

Pro popis jednotlivých součástí bylo čerpáno ze zdroje [16].

1.6.1 Přípravné a skladovací nádrže

Pro skladování substrátu je důležité mít přípravnou nádrž. Z které dochází jedenkrát až dvakrát denně k přečerpávání substrátu do fermentoru. Je nutné, aby nádrž měla dostatečně velký objem, aby dané množství byla schopna pojmout. Musí být utěsněna proti úniku substrátu. Nádrž se většinou nechává otevřená, jelikož má přístup vzduchu příznivé působení na první fázi rozkladu. Může být také využívána pro přimísení, rozmělnování a zkapalňování kofermentů nebo tuhého hnoje. V případě potřeby musí být možné do nádrže snadno vložit mixér nebo řezačku a kontrolovat jejich chod. Cylindrický tvar je vhodný pro míchání.

Skladovací nádrž je často nazývána také jako koncový sklad. Slouží k jímání vyhnílé kejdy z průtokových zařízení. Je většinou kryta pevným stropem nebo fóliovým poklopem, aby se zabránilo ztrátám dusíku a bylo možné jímat plyn vznikající dokvašováním. Velikost musí být taková, aby v době vegetačního klidu, kdy rostliny nepřijímají živiny, zde mohla být kejda skladována. V závislosti na klimatu a kultuře jde o období 6 až 7 měsíců.

1.6.2 Fermentory

Nejdůležitější částí bioplynové stanice je fermentor, ve kterém probíhá anaerobní fermentace. Dle konstrukce fermentoru rozlišujeme dva druhy, horizontální konstrukční typ a vertikální konstrukční typ. Výhodou vertikální konstrukce oproti té horizontální, je schopnost dosáhnoutí lepšího poměru mezi povrchem a objemem, čímž se sníží materiálové náklady a tepelné ztráty.

Důležitou součástí fermentorů jsou míchadla. Substrát je nutné promíchávat několikrát denně. Díky míchadlům dochází ke smíchání čerstvého substrátu s již vyhnívajícím substrátem z důvodu, aby docházelo k naočkování čerstvého substrátu aktivními bakteriemi. Dále pomáhají udržet rovnoměrnou teplotu ve fermentoru, zabraňují vzniku nebo odstraňují plovoucí příkrovy a usazeniny. Dělí se na mechanická, hydraulická a pneumatická míchadla.

1.6.3 Kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka je zařízení sloužící k výrobě tepla a elektrické energie. Je sestavena z plynového spalovacího motoru a generátoru elektrické energie. Existují bioplynové stanice, které obsahují pouze jednu kogenerační jednotku, kde je výhodou jednoduchá údržba a servis, ale jsou také stanice s více kogeneračními jednotkami, kde je naopak nevýhodou údržba, ale v případě, že se jedna kogenerační jednotka pokazí, provoz může stále fungovat.

1.6.4 Další zařízení

Bioplynovou stanicí tvoří další důležitá zařízení, které nejsou v této kapitole představeny. Tyto části tvoří nedílnou součást celého procesu. Podrobně jsou popsány v literatuře [16] a [7]. Mezi tyto zařízení patří:

- Plynojem
- Topná zařízení
- Kontrolní, měřicí a ovládací zařízení

2 Popis výpočtových metod pro stanovení bioplynu

Stanovení přesné výtěžnosti bioplynu je velmi obtížné a mnohdy takřka nemožné. Je to z důvodu mnoha parametrů a jejich vlivů na fermentační proces. K určování výtěžnosti bioplynu se tedy využívají různé analýzy, laboratorní testy nebo výpočtové metody. Laboratorní testy a analýzy jsou většinou časově a finančně náročné. Z toho důvodu je výhodné využití matematických modelů pro rychlý odhad produkce bioplynu. Výsledky výstupních hodnot z výpočetních modelů mohou být dále využity například ke zvolení vhodného substrátu nebo navrhování vhodných poměrů dávkování vstupních substrátů. Kvalita substrátu je nejdůležitější částí při výtěžnosti bioplynu a podle ní se odvíjí výsledná hodnota. Třemi základními způsoby výpočtů množství vyrobeného bioplynu z organických odpadů jsou [18]:

- Výpočet podle tabulkových hodnot – Využívají se zde údaje získané z experimentálních pokusů, nebo analýzou literárních údajů.
- Výpočet podle předpokládaného úbytku organické sušiny zpracovávaného materiálu – Předpokladem je zde znalost měrné produkce bioplynu z jednotkového množství sušiny zpracovávaného materiálu.
- Výpočet podle chemického složení materiálu – V reaktorech se zpracovává stále více směsných materiálů, používá se tedy výpočet produkovaného bioplynu každé jednotlivé složky (uhlohydráty, tuky, bílkoviny) zvlášť.

Podrobněji zde budou popsány především výpočty podle chemického složení materiálu a výpočty podle tabulkových hodnot. Tyto dva způsoby byly oproti výpočtu podle předpokládaného úbytku organické sušiny zpracovávaného materiálu, který již dále není v této práci zkoumán, vybrány kvůli jejich jednoduchosti a dobré dostupnosti jejich parametrů. Výpočtové metody budou využity v případové studii k vyhodnocení výtěžnosti bioplynu kukuřičné siláže, travní senáže a prasečí kejdy, které budou následně porovnány s fermentačními testy a naměřenými hodnotami z BPS Valašské Meziříčí, ve které jsou tyto substráty nejčastěji využívány. Kukuřičná siláž tvoří 34 % z celkového množství využívaných substrátů v ČR [19].

2.1 Buswellova metoda

Již ve třicátých letech minulého století byl Buswellem navržen výpočet teoretické produkce methanu z hmotově energetické bilance [20]. Při výpočtu touto metodou je nutno znát prvkové složení substrátu. Výpočet vychází z množství vyměňovaných elektronů během anaerobních pochodů při procesu tvorby bioplynu. Tato metoda nezahrnuje biologickou rozložitelnost a nezahrnuje ani spotřebu substrátu na růst nové biomasy [6].

Při hmotově energetické bilanci se uvažuje organická sloučenina sumárního vzorce $C_xH_yO_z$, kde indexy x, y, z značí počet atomů jednotlivých prvků [7]. Úplná oxidace této látky probíhá podle rovnice [7]:

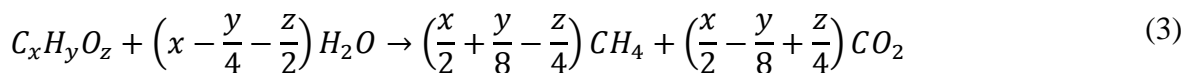


kde:

$$n = 2x + \frac{y}{2} - z \quad (2)$$

Číslo n udává počet atomů kyslíku potřebných k úplné oxidaci dané organické látky. Protože jeden atom kyslíku představuje dva elektronové ekvivalenty, číslo $2n$ udává elektronový ekvivalent molekuly dané organické látky, tj. počet elektronů, které tato molekula předá při úplné oxidaci finálnímu akceptoru elektronů [7].

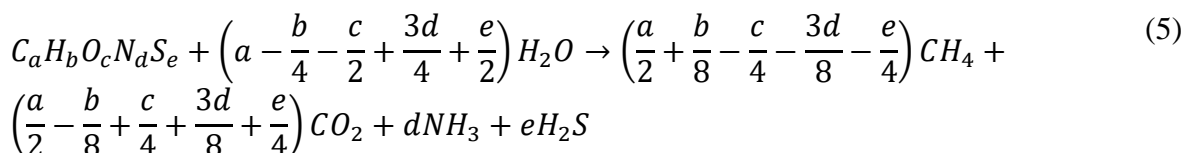
Obecná stechiometrická rovnice vzniku methanu podle Buswella je následující [20]:



Pro výpočet výtěžnosti methanu pomocí Buswellova vztahu je tedy nutná znalost sumárního vzorce zkoumané biomasy neboli elementárního složení v molárních procentech, jak lze vidět v rovnici (4) a nebo znalost hodnoty teoretické spotřeby kyslíku, značené TSK [6]:

$$CH_4[Nml] = 350 \cdot TSK \quad (4)$$

Později Boyle modifikoval chemickou reakci Buswella a zahrnul dusík a síru, aby se získala frakce amoniaku a sirovodíku ve vyrobeném produktu bioplynu [4]:



Kde koeficienty a , b , c , d , e představují počet atomů jednotlivých prvků. Z této chemické rovnice je nezbytné určení množství CH_4 v reakci, které slouží k určení množství výsledného bioplynu.

Chemická rovnice lze přepsat do zjednodušené formy dle [4]:



Kde parametry A , B jsou reaktanty a parametry C , D , E , F jsou produkty.

Jednotlivé rovnice pro dané konstanty látek v zjednodušené rovnici jsou [4]:

$$\begin{aligned} C_1 &= a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2} \\ C_2 &= \frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \\ C_3 &= \frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \\ C_4 &= d \\ C_5 &= e \end{aligned} \quad (7)$$

Biochemická reakce je automaticky vyvážená a může být aplikována na jakýkoliv vstup se známými relativními poměry uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a síry. Dochází zde k předpokladu, že vstupní materiál neobsahuje další prvky. Jednotlivé konstanty každého prvku se vypočítají podle procentuálního zastoupení každého prvku z daného substrátu, které jsou získávány analýzou a lze je najít v různých literaturách, podělené molární hmotností prvku [4].

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\%C}{mm_c} = \frac{\%C}{12,0107} \\
 b &= \frac{\%H}{mm_H} = \frac{\%H}{1,0079} \\
 c &= \frac{\%O}{mm_o} = \frac{\%O}{15,999} \\
 d &= \frac{\%N}{mm_N} = \frac{\%N}{14,0067} \\
 e &= \frac{\%S}{mm_s} = \frac{\%S}{32,065}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Kde parametry v jmenovateli zlomku představují molární hmotnosti jednotlivých prvků.

Teoretická hodnota methanu (v originále TBMP – theoretical biochemical methane potential) počítaného substrátu lze pak vypočítat dle:

$$TBMP = \frac{22,4 \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \right)}{12,017a + 1,0079b + 15,999c + 14,0067d + 32,065e} \left[\frac{ml CH_4}{g oTS} \right] \tag{9}$$

Z těchto výpočtů ze zdroje [4] se předpokládá výpočet za konstantní teploty, ideálních bakteriálních podmínkách, materiál obsahující pouze prvky C, H, O, S, N, produkty z reakce obsahující pouze CH₄, CO₂, NH₃ a H₂S. Jelikož je výpočet prováděn za těchto ideálních, nerealistických podmínek, je proto přidán faktor f (=80%) [4], kde se jako výsledná hodnota bere 80 % část TBMP, aby došlo k přizpůsobení k reálným podmínkám. Upravená teoretická hodnota methanu se bude značit ATBMP (adjusted theoretical biochemical methane potential). Dále lze pomocí hodnoty kvality methanu určit výsledná teoretická odhadová hodnota produkce bioplynu TBP.

Jedná se o jednoduchou a rychlou metodu, a proto bude využita v případové studii. V kapitole 3.2.1 je proveden výpočet pro stanovení odhadu produkce bioplynu pro substráty kukuřičné siláže, travní senáže a kejdy.

K umožnění výpočtu pro srovnání s provozními daty na případové studii bude sloužit vztah:

$$BP_{celkB} = \sum m_i \cdot TBP_i \text{ [m}^3\text{]} \tag{10}$$

kde:

BP_{celkB} – odhadovaná produkce bioplynu za určité období Buswellovou hodnotou

m_i – množství využitého typu substrátu

TBP_i – teoretická výtěžnost typu substrátu

2.2 CHSK

Zkratka CHSK vyjadřuje parametr, kterým je chemická spotřeba kyslíku. CHSK se používá pro kvantifikaci množství organické hmoty v odpadních tocích a předvídání potenciálu pro výrobu bioplynu. Je to jedna z nejvyužívanějších metod v anaerobních technologiích. Velkou výhodou je snadná přepočitatelnost na množství methanu [6]. Množství kyslíku potřebné pro oxidaci

komplexního substrátu lze odhadnout na základě stanovení CHSK. V anaerobním systému, kde jsou jiné finální akceptory elektronů než kyslík, lze použít vztah ekvivalentu dostupných elektronů a jednoho molu kyslíku a používat pro míru energetického obsahu substrátu kyslíkové jednotky ve formě CHSK nebo TSK, což je teoretická spotřeba kyslíku na úplnou oxidaci dané organické látky vypočítaná z elementárního složení [7].

Výtěžnost methanu je závislá na druhu substrátu, a to především na jeho oxidačním stupni, tedy na množství dostupných elektronů, které má molekula substrátu k dispozici. Tyto veličiny jsou definovány jako průměrné oxidační číslo atomu uhlíku (dále zde vyjadřováno zkratkou POXČ), které udává stupeň oxidace uhlíkového atomu v molekule nebo jako stupeň redukovanosti substrátu, který je označován jako γ . Výtěžnost methanu je vyšší, čím je vyšší γ nebo nižší hodnota POXČ. Mezních hodnot dosahují sloučeniny methanu a oxidu uhličitého [7]. Zdroj [7] dále také uvádí v tabulkách jednotlivé bilance výtěžnosti methanu pro některé substráty.

Při bilanci anaerobního rozkladu pomocí CHSK vycházíme ze vztahu (11) [6]:

$$CHSK_{\text{odstraněná}} = CHSK_{\text{bioplynu} + \text{nové biomasy}} \quad (11)$$

Kde $CHSK_{\text{odstraněná}}$ vyjadřuje odstraněnou neboli biologicky rozloženou část substrátu při anaerobní fermentaci. Protože oxid uhličitý není možné dále oxidovat, je veškerá odstraněná CHSK obsažená v bioplynu – v methanu a v nově syntetizované biomase. Vzhledem k tomu, že při methanogenezi je spotřeba CHSK na růst biomasy nízká, můžeme v určitém přiblížení pro bilanci použít vztah (12) [6]:

$$CHSK_{\text{odstraněného substrátu}} = CHSK_{\text{methanu}} \quad (12)$$

Ve skutečnosti je výtěžnost methanu nižší z dvou důvodů, a to že CHSK může zahrnovat i biologicky nerozložitelnou část a protože se část CHSK spotřebuje na růst biomasy [7].

Teoretickou výtěžnost methanu lze vyjádřit pomocí vztahu (13) [7]:

$$Y_{CH_4 \text{ teor.}} = 0,25 \cdot CHSK \text{ [g/g]} \quad (13)$$

Ve využitém zdroji [7], lze nalézt tabulku vyjadřující bilance výtěžnosti methanu pro některé substráty. Dále je v této literatuře také uvedena tabulka přepočtových koeficientů mezi CH_4 a CHSK:

Tabulka 2-1 Přepočtové koeficienty mezi CH_4 a CHSK [7]

1 mol CH_4	2 mol O_2 , 64 g CHSK, 22,36 l
1 g CHSK	0,25 g CH_4 , 0,349 l CH_4
1 g CH_4	4 g CHSK, 1,395 l
1 litr CH_4	2,9867 g CHSK

Výpočet teoretické koncentrace methanu v bioplynu lze vypočítat ze vztahu (14) při znalosti CHSK a (15) při znalosti POXČ [7]:

$$\%obj. CH_4 = 18,75 \cdot \frac{CHSK}{C_{org.}} \quad (14)$$

kde:

C_{org} – množství organického uhlíku substrátu

$$\%obj. CH_4 = \frac{4 - POXČ}{8} \cdot 100 \quad (15)$$

Druh substrátu a podmínky procesu methanizace určují vztah mezi teoretickou a skutečnou hodnotou výtěžnosti methanu. Nevýhodou této metody je nutnost stanovení CHSK, které je založeno na oxidaci vzorku dichromanu v kyselém prostředí a s přítomností katalyzátoru, které bývá nejčastěji prováděno ve vodohospodářských laboratořích [6]. Z tohoto důvodu nebyla metoda CHSK vybrána k dalšímu výpočtu pro případovou studii.

2.3 MEVM

Metoda MEVM (Methane energy value model) neboli model energetické hodnoty methanu, také nazýván jako krmivářská analýza, byla navržena Thomasem Amonem [21]. Stejně jako předešlé metody zjišťuje tento postup výtěžnost methanu. Odhaduje specifický výtěžek methanu z nutričního složení energetických plodin. Ze zemědělských substrátů je jednoduché získání vstupních parametrů, což je velkou výhodou této metody. Důležitými vstupními parametry jsou dusíkaté látky (XP), tuky (XL), vláknina (XF) a bezdusíkaté výtažkové látky (XX) [21]. Tyto vstupní parametry je nutno stanovit v laboratoři.

Rovnice pro výpočet dle [21]:

$$MEVM(CH_4) = x_1 \cdot XP + x_2 \cdot XL + x_3 \cdot XF + x_4 \cdot XX \quad (16)$$

Jak lze z rovnice (16) vidět, výpočet je velice snadný a rychlý. Problémem jsou koeficienty $x_1 - x_4$, které bývají odvozeny experimentálně na základě poměrně velkého množství dat a zahrnují v sobě výtěžnost bioplynu korigovanou anaerobní rozložitelností [6]. Z toho důvodu může docházet k vyšším nepřesnostem na rozdíl od ostatních metod.

Model energetické hodnoty methanu pomáhá optimalizovat produkci bioplynu následujícími schopnostmi [21]:

- Odhad specifického výtěžku methanu organických substrátů.
- Odhad nutričních požadavků mikroorganismů, které jsou zodpovědné za anaerobní fermentaci.
- Odhad výrobitelného výkonu zemědělské výroby bioplynové stanice v závislosti na dostupném množství a složení organického substrátu.
- Odhad výtěžnosti methanu na hektar energetické plodiny a střídání plodin.
- Doporučení ohledně optimální doby sklizně energetické plodiny.

Metoda nebyla vybrána k dalším výpočtům pro případovou studii z důvodu její větší nepřesnosti, ke které docházelo například ve studii [6] a kvůli problému získání koeficientů, které je nutno získat experimentálními měřeními.

2.4 Výpočet podle tabelovaných hodnot

Při výpočtu dle tabulkových hodnot se vychází z údajů získaných z laboratorních testů, analýz, a především literárních údajů. Taková data jsou využívána pouze pro srovnávací účely a ve výsledku se dají očekávat rozdíly. Pro srovnání údajů v této práci bude využito hodnot kukuřičné siláže, travní senáže a prasečí kejdy ze zdroje [22]. U tabelovaných hodnot podle různých zdrojů dochází k rozdílům, u kukuřičné siláže a travní senáže jsou hodnoty podobné a většinou se liší velmi málo. Při porovnávání hodnot hovězí a vepřové kejdy z různých zdrojů dochází k velkým rozdílům. Například, zdroj [16] uvádí měrný výtěžek methanu pro vepřovou kejdu 134–389 m³/t a zdroj [23] uvádí 222–533 m³/t. Stanovení přesné hodnoty kejdy je tedy velice obtížné. Ve zdroji [7] lze najít přehled výtěžků methanu pro řadu dalších substrátů. Tabelované hodnoty jsou pouze srovnávací údaje a slouží tedy jen orientačně. Jedná se o jednoduchou metodu, a proto bude využita v případové studii.

Rovnicí (17) je počítán odhad produkce bioplynu pomocí tabelovaných hodnot, jejichž výsledky jsou využity v kapitole 3.2.2 pro srovnání s daty z provozu.

$$BP_{celkT} = \sum m_i \cdot BP_i \quad [m^3] \quad (17)$$

kde:

BP_{celkT} – odhad produkce bioplynu za určité období tabelovanými hodnotami

m_i – množství využitého typu substrátu

BP_i – hodnota výtěžku bioplynu využitého typu substrátu

3 Případová studie

Pro případovou studii byla vybrána bioplynová stanice ve Valašském Meziříčí, která je od roku 2012 provozována dceřinou společností Agropodniku, a.s. Valašské Meziříčí. Jedná se o zemědělskou bioplynovou stanici, která slouží pro vysoce ekologické a účinné zpracování statkových exkrementů a fytomasy k produkci elektřiny a tepla z bioplynu [24]. Jeho produkce je odhadnuta pomocí Buswellovy metody a tabelovaných hodnot a výsledky jsou porovnány s reálnou produkcí bioplynu v BPS Valašské Meziříčí.

3.1 Popis BPS Valašské Meziříčí

Informace a zde uvedené jsou čerpány z provozního řádu a vlastních poznatků z exkurze bioplynové stanice [25].

3.1.1 Technický popis

Zemědělská bioplynová stanice se skládá z:

- vstupní jímky o objemu 131 m³
- 2 fermentorů o objemu 1 630 m³
- 2 dofermentorů s integrovanými zásobníky bioplynu o objemu 1 970 m³
- 2 skladovacích jímek o objemu 3 450 m³
- výroby elektrické energie, kterou tvoří strojovna se čtyřmi kogeneračními jednotkami
-

Vstupní jímka má funkci sběru silážní šťávy, kejdy a znečištěné povrchové vody. Nádrž je zakrytá a tvořena železobetonovou konstrukcí.



Obr. 3-1 Vstupní jímka v BPS Valašské Meziříčí

Ze vstupní jímky je substrát dávkován do fermentoru. K plnění tekutých látek dochází pomocí čerpadla a k plnění pevné biomasy slouží dávkovací zařízení. Dávkovač se skládá z kontejnerového zásobníku s posuvným čelem a rozdružovacím nástavcem. Plnění zásobníku je prováděno shora. Po spuštění je zařízení plně automatizováno.

Sklizená a nařezaná fytomasa je upravena zasilážováním, čímž se uchovávají veškeré živiny a energie do doby, než se nadávkuje do fermentorů k biologickému procesu. Hodnota pH substrátu je neutrální až mírně zásaditá, tedy 7,5–8. Prasečí kejda se nijak nezpracovává a je

v původním stavu přečerpána do fermentoru. Ve fermentorech probíhají biologické procesy. Vstupní biomasa je ve fermentačních nádržích zpracována kvašením. Jedná se o nádrže kruhového půdorysu. Strop je tvořen dřevěnou konstrukcí, která rozděluje nádrž na 2 části. Ve spodní části dochází pomocí míchacího zařízení k fermentaci a v horní části je jímán bioplyn, který nafukuje gumotextilní elastickou membránu, která je položena na dřevěné konstrukci. Nádrž je zateplena deskami z extrudovaného polystyrenu a na vnitřních stěnách osazena teplovodním vytápěním. Po výrazném biologickém rozkladu vstupních materiálů ve fermentorech je fermentát přečerpáván šnekovým čerpadlem v mezišachtě do druhého stupně anaerobní fermentace, tj. do dofermentoru, kde se zbytková sušina fermentátu kompletně rozloží, čímž vznikne stabilizovaný digestát. Konstrukce dofermentorů je podobná. Jejich vybavení, zateplení, konstrukce stropu a rozdělení nádrže je stejné. Rozdílem je dofermentace, která probíhá ve spodní míchané části. Míchací zařízení u fermentorů a dofermentorů slouží k lepší produkci bioplynu a k zabránění tvorby plovoucí vrstvy a klesající vrstvy sedimentů.



Obr. 3-2 Fermentor a dofermentor v BPS Valašské Meziříčí

Membrána sloužící k jímání bioplynu se vyznačuje svojí odolností proti protržení a šíření trhlin. Bioplyn je uchováván v horní válcové části fermentační nádrže pod dřevěným stropem. Maximální kapacita každého z fermentorů je 2 090 m³ a každého z dofermentorů je 2 780 m³.

Hydraulický zádržný čas vstupního materiálu ve fermentačních nádržích je následující:

- fermentory – 50 dnů
- dofermentory – 60 dnů
- celkový čas 2–stupňové anaerobní fermentace v bioplynové stanici – 110 dnů

Procesní sušiny v jednotlivých fermentačních nádržích je velice složité přesně specifikovat, protože procento sušiny je ovlivňováno velkým množstvím variabilních faktorů (např. množství a kvalita vstupů, teplota a pH v každé úrovni procesu, zastoupení jednotlivých bakterií, kvalita a četnost míchání, intenzita čerpání atd.). Podstatou je, že uvedený hydraulický zádržný čas substrátu v každé fermentační nádrži je výrazně předimenzován v porovnání s nutnou zádržnou

dobou pro kompletní biologický rozklad uvedených vstupů za popsaných podmínek anaerobní fermentace.

Biologicky odsířený bioplyn je plynovým potrubím veden přes kondenzační šachtu ke kogeneračním jednotkám. Před vstupem do kogenerační jednotky je plyn sušen, chlazen a čištěn filtrem s aktivním uhlím. Kogenerační jednotky, které jsou poháněny bioplynem, vyrábí elektrický proud, který je dodáván do elektrické distribuční sítě. Současně vzniká při výrobě elektrického proudu i teplo, které se využívá pro ohřev vody. Teplá voda je využívána k vytápění fermentorů a dofermentorů, a dalších budov areálu provozovatele. Nouzové chladiče zajišťují, aby se kogenerační jednotky nepřehřály.

Tepelná energie vyprodukovaná v kogeneračních jednotkách se přes chladicí okruh a deskový výměník tepla přivádí do topného systému. Další teplo je získáváno přes výměník výfukových spalin. Čerpadlem na kogeneračních jednotkách se dopravuje získané teplo z chladicího okruhu a okruhu výfukových plynů do tepelného výměníku. Teplá nemrznoucí kapalina, která se nedopravuje ke spotřebičům, je přes hydraulicko-termický výměník vedena zpět ke kogenerační jednotce.



Obr. 3-3 Kogenerační jednotka v BPS Valašské Meziříčí

Skladovací jímky jsou železobetonové nádrže, které nejsou zakryté a jsou zapuštěny do terénu. Slouží k jímání koncového produktu. Každá skladovací jímka je vybavena třemi ponornými míchadly.

3.1.2 Zpracovávané suroviny

Hlavními zpracovávanými substráty v bioplynové stanici je kukuřičná siláž, travní senáž a prasečí kejda. V menším množství je někdy zpracovávané také zrno a GPS. Vstupní suroviny pochází z produkce smluvních partnerů.

Vstupní biomasa:

- | | | |
|-------------------|-------------------|--------------|
| • prasečí kejda | cca 14 330 kg/den | 5 230 t/rok |
| • kukuřičná siláž | cca 49 000 kg/den | 17 885 t/rok |
| • travní siláž | cca 49 000 kg/den | 17 885 t/rok |

Hodnoty vstupní biomasy jsou pouze orientační a jejich množství závisí na dodavatelích. Jak lze vidět nejčastějším substrátem je kukuřičná siláž a travní senáž, které bývají zpracovávány v téměř stejném poměru.

Množství dávek vstupů je silně ovlivněno jejich kvalitou. Důležité je, že provozovatel musí denně nadávkovat příslušné množství organické sušiny, které odpovídá přiměřené produkci a kvalitě bioplynu pro provoz bioplynové stanice na plný výkon.

Denně je vykonáván záznam o dávkovaných vstupech provozu čerpadel, míchadel, kogeneračních jednotkách, kvality bioplynu atd. do provozního deníku umístěného přímo na stanici. Množství produkovaného bioplynu ze vstupní biomasy představuje cca 9 645 Nm³/den. To odpovídá potřebnému množství bioplynu pro provoz bioplynové stanice na plný výkon.

3.1.3 Výstupy z technologie

Produkty

- stabilizovaný digestát cca 52,46 t/den, tj. 19 147 t/rok
- elektrický výkon 4 × 250 kW, tj. 8,3 mil. kWh/rok (dodávána do distribuční sítě)
- tepelný výkon 4 × 232 kW, tj. 7,7 mil. kWh/rok (pro ohřev fermentačních nádrží a požadovaných prostor provozovatele (správní budova, garáže, dílny, vrátnice a výroba plastových oken a dveří)

Koncový produkt fermentačního procesu, stabilizovaný digestát, je produkován ve formě kalové vody o obsahu celkové sušiny 4–6 % v závislosti na vlastnostech substrátu a průběhu anaerobního procesu. Stabilizovaný digestát je využíván pro potřeby hnojení zemědělské půdy dodavatelů.

Odpady

Z technologie vznikají pouze odpady z amortizace technických zařízení. Vyjetý olej z provozu mechanických částí převodovek, motorů je produkován o objemu cca 135 l/měsíc.

Znečišťující látky

Maziva, oleje jsou likvidovány v souladu s podmínkami odpadového hospodářství investora.

3.2 Výpočet odhadu produkce bioplynu

Výpočty teoretických hodnot bioplynu bude stanoven pro nejčastěji zpracovávané substráty bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí.

3.2.1 Výpočet Buswellovou metodou

Pro výpočet odhadu bioplynu byla vybrána rozšířená Buswellova metoda. Při využití této metody je nutno znát přesné prvkové složení substrátu, kde je potřebná znalost procentuálního obsahu uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a síry. K vyhodnocení nejpřesnějšího výpočtu by bylo vhodné vždy provedení prvkového rozboru pro počítaný substrát. Řada prvkových složeních

lze nalézt v databázi pro biomasu a odpad [26]. Pro výpočet v této práci byl udělán palivářský rozbor na Ústavu procesního inženýrství pro vzorky substrátu kukuřičné siláže a travní senáže z bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí.

Výsledky prvkového rozboru byly následující:

Tabulka 3-1 Prvkové složení kukuřičné siláže a travní senáže

Prvek	Kukuřičná siláž	Travní senáž
Uhlík C [% hm.]	44,11	38,50
Vodík H [% hm.]	6,32	5,08
Kyslík O [% hm.]	43,13	41,28
Dusík N [% hm.]	1,46	1,75
Síra S [% hm.]	0,21	0,82

Prvková složení se budou pokaždé mírně lišit, jelikož je například mnoho různých odrůd kukuřičné siláže a substráty jsou dováženy od několika dodavatelů. Rozdíl by neměl být příliš velký, a proto je využíváno v celé práci těchto dvou prvkových složení.

V případě prasečí kejdy nebyl vzorek z BPS k dispozici a prvkové složení je bráno z databáze pro biomasu a odpad [26]:

Tabulka 3-2 Prvkové složení prasečí kejdy [27]

Prvek	Prasečí kejda
Uhlík C [% hm.]	43,84
Vodík H [% hm.]	5,55
Kyslík O [% hm.]	39,19
Dusík N [% hm.]	2,45
Síra S [% hm.]	0,93

Tato data prvkového rozboru prasečí kejdy se mohou oproti realitě lišit, ale nebyl pro tento substrát proveden prvkový rozbor, a proto je prvkové složení uvedené v tabulce využíváno v následujících výpočtech.

Výpočet je proveden dle rovnic uvedených v kapitole 2.1. Dané množství atomů jednotlivých prvků je vypočítáno pomocí rovnice (8) a koeficienty molekul dle rovnice (7).

Tabulka 3-3 Částečný výpočet koeficientů dle Buswellovy metody

Substrát	Chemická rovnice	% CH ₄
Kukuřičná siláž	$C_{37}H_{63}O_{27}N + 8 H_2O \rightarrow 19 CH_4 + 18 CO_2 + NH_3$	49,83
Travní senáž	$C_{32}H_{50}O_{26}N + 8 H_2O \rightarrow 15 CH_4 + 17 CO_2 + NH_3$	45,01
Prasečí kejda	$C_{37}H_{55}O_{24}N_2 + 12 H_2O \rightarrow 18 CH_4 + 19 CO_2 + 2 NH_3$	46,55

Po určení jednotlivých koeficientů, lze pomocí rovnice (9) snadno dopočítat teoretickou hodnotu výtěžnosti methanu, která se přepočítá na 80% hodnotu výtěžnosti pro upravení

procesu na reálné podmínky. Následně lze pomocí procentuálního obsahu methanu dopočítat výtěžnost bioplynu.

Tabulka 3-4 Výsledky výpočtů dle Buswellovy metody

Substrát	TBMP [m ³ /t]	ATBMP [m ³ /t]	TBP _i [m ³ /t]
Kukuřičná siláž	449	359	721
Travní senáž	394	315	700
Prasečí kejda	446	357	766

kde:

TBMP – teoretická hodnota výtěžku methanu

ATBMP – upravená teoretická hodnota výtěžku methanu

TBP – teoretická hodnota výtěžku bioplynu

3.2.2 Výpočet tabelovanými hodnotami

K ověření vhodnosti metody výpočtu pomocí tabelovaných hodnot jsou využity hodnoty ze zdroje [22], které byly získány výzkumem. V uvedeném zdroji lze nalézt více zkoumaných substrátů.

Tabulka 3-5 Využité tabelované hodnoty [22]

Substrát	TS [%]	oTS [%]	Výtěžek CH ₄ [m ³ /t oTS]	Výtěžek BP _i [m ³ /t oTS]	% CH ₄
Kukuřičná siláž	32,6	94,7	346	642	54,0
Travní senáž	28,3	89,0	332	627	52,9
Prasečí kejda	4,7	71,9	234	385	60,8

Z uvedené tabulky lze vidět, že z vybraných substrátů dosahují nejvyšších výtěžků bioplynu hodnoty kukuřičné siláže. Jak již bylo zmíněno hodnoty se dle jiných zdrojů mohou lišit. Hodnoty lze využít pro orientační odhad vyprodukovaného bioplynu.

3.3 Srovnání s fermentačními testy

Pro srovnání výsledných hodnot výpočtů z kapitoly 3.2 byly využity fermentační testy provedené v Laboratoriu biologického dozoru společnosti agriKomp Bohemia s.r.o. ve Střelcích ze vzorků z bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí. Praktické vyhodnocení produkce methanu ze substrátů bylo prováděno podle normy VDI 4630. V laboratorních testech bylo experimentálními měřeními, které trvají 20–30 dní, stanoveno množství sušiny, produkce methanu, kvalita bioplynu a následně očekávanou produkci bioplynu.

Pro porovnání byly využity 3 fermentační testy kukuřičných siláží a 2 fermentační testy travní senáže. Tyto 2 substráty jsou nejčastějším zpracovávaným materiálem v bioplynové stanici ve Valašském Meziříčí. Jednotlivé vzorky kukuřičné siláže jsou od sebe odlišeny pomocí písmen A, B, C, taktéž oba vzorky travní senáže jsou od sebe odlišeny jako typy A a B.

Tabulka 3-6 Výsledky fermentačních testů kukuřičné siláže

Kukuřičná siláž				
	A	B	C	
TS	42,27	37,33	46,99	% ČM
oTS	40,07	35,57	45,11	% ČM
Max. produkce CH₄	116	103	129	Nl CH ₄ /kg ČM
	290	289	286	Nl CH ₄ /kg oTS
Kvalita bioplynu	47,2	47,1	47,3	% CH ₄
Produkce bioplynu	246	219	273	Nm ³ z 1 t ČM
	614	614	605	Nm ³ z 1 t oTS

kde:

TS – celková sušina

oTS – organická sušina

ČM – čerstvý materiál

Nl – normovaný litr

Nm³ – normovaný metr krychlový

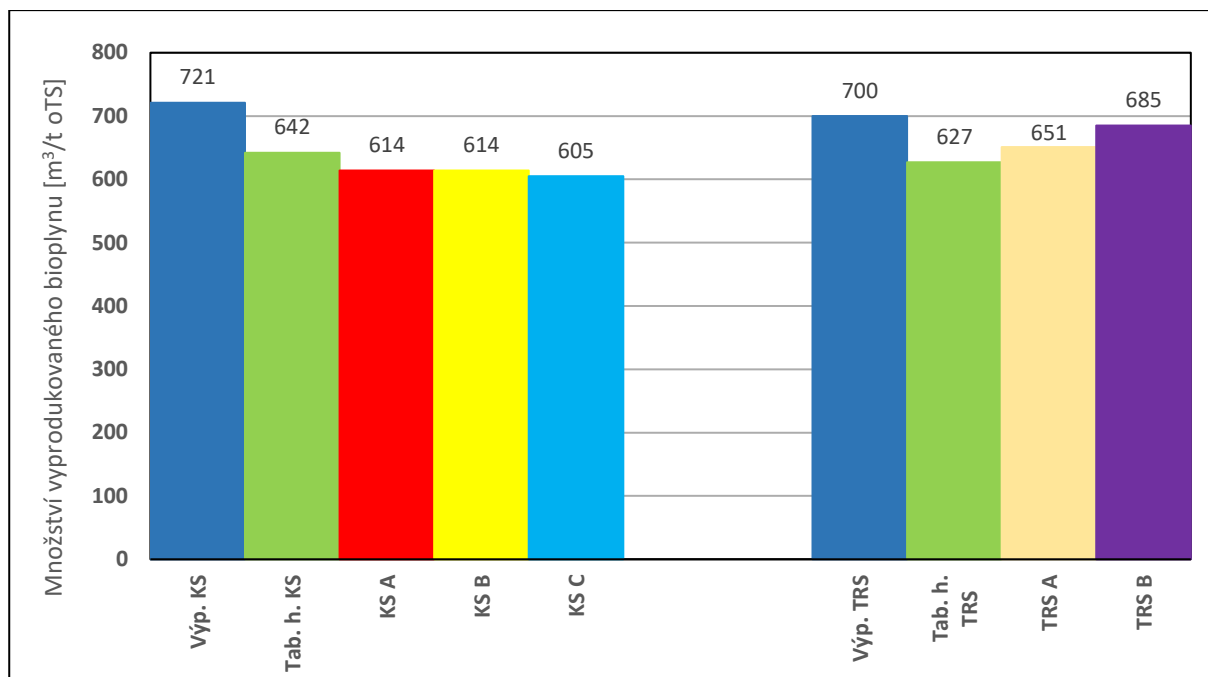
Výsledky fermentačních testů kukuřičné siláže rozdílných vzorků dosáhly velmi podobných výsledků. Vzorek A a B docílilo stejné očekávané produkce, vzorek C mírně nižší.

Tabulka 3-7 Výsledky fermentačních testů travní senáže

Travní senáž			
	A	B	
TS	25,72	30,38	% ČM
oTS	22,64	27,19	% ČM
Max. produkce CH₄	74	93	Nl CH ₄ /kg ČM
	327	340	Nl CH ₄ /kg oTS
Kvalita bioplynu	50,2	49,6	% CH ₄
Produkce bioplynu	147	187	Nm ³ z 1 t ČM
	651	685	Nm ³ z 1 t oTS

Očekávaná produkce bioplynu travní senáže bývá nižší než produkce kukuřičné siláže, i přesto výsledky fermentačních testů dosáhly vyšších výsledků.

Na následujícím obrázku lze vidět grafické porovnání hodnot výsledků fermentačních testů, vypočítaných výsledků dle Buswellovy metody a tabelovaných hodnot uvedených v kapitole 3.2.2 a výsledků fermentačních testů.



*Obr. 3-4 Porovnání výtěžnosti bioplynu pro substráty kukuřičné siláže a travní senáže:
 KS – kukuřičná siláž, Výp. KS – výpočet kukuřičné siláže Buswellem, Tab. h. KS – tabelované hodnoty kukuřičné siláže, TRS – travní senáž Výp. TRS – výpočet travní senáže Buswellem,
 Tab. h. TRS – tabelované hodnoty travní senáže*

Jak lze pozorovat z uvedeného srovnání, Buswellovou metodou dosahují výsledky vyšších hodnot, než tabelované hodnoty a laboratorní měření, především kukuřičná siláž. Výsledky výpočtu kukuřičné siláže se více blíží tabelovaným hodnotám, kdežto výpočty travní senáže mají mezi sebou celkově menší rozdíly a Buswellovou metodou vypočítané hodnoty se blíží více výsledkům fermentačních testů. Obecně lze očekávat od Buswellovy metody dosažení vyšších výsledků, jelikož výsledky by měly předpovídat maximální potenciál výtěžnosti bioplynu. Pro přesnější výsledky by bylo nutné udělat prvkový rozbor pro všechny zkoumané typy siláže a senáže.

3.4 Srovnání s provozními daty

Pro další srovnání a získání přehledu o přesnosti metody, byla využita data spotřebovaného plynu v motorech z provozního deníku poskytnutého bioplynovou stanicí ve Valašském Meziříčí, které se dají považovat za produkci bioplynu. Provozní deník udává přehled množství zpracovaného substrátu a vyprodukovaného bioplynu za daný měsíc. Bylo vybráno období 5 měsíců (listopad 2018 – březen 2019), ve kterých byla zpracována téměř jen kukuřičná siláž, travní senáž a kejda.

Za každý měsíc je uvedené zpracované množství čerstvého materiálu siláže, senáže a kejdy, které je přepočítané na hodnoty sušiny. Z provozního řádu bioplynové stanice se předpokládá, že celková sušina siláže a senáže je 35 %, u kejdy 7 %. Podle zkušeností je možno předpokládat zastoupení organické sušiny na úrovni 75–95 %. Z toho důvodu bylo pro přepočet na sušinu brána pro senáž a kejdu hodnota organické sušiny 85 % a pro siláž 90 % z důvodu, že siláž dosahuje vždy vyšší hodnoty sušiny. Následně jsou tyto hodnoty zvlášť počítány s výsledky výpočtů pomocí Buswella a tabelovanými hodnotami.

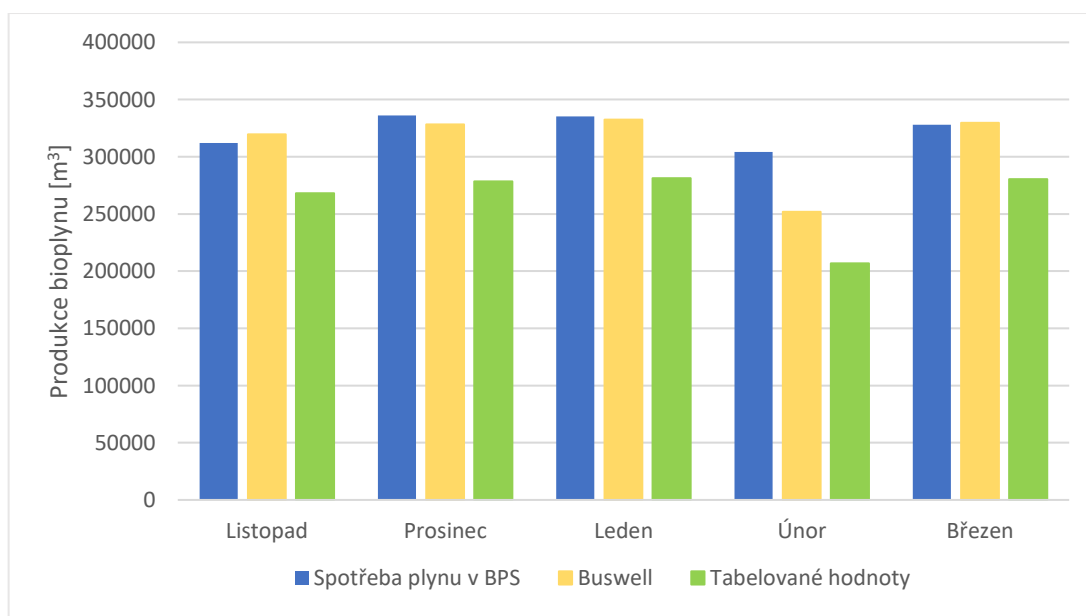
V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty zpracovaných substrátů za 5 měsíců, spotřeba bioplynu v motorech a vypočítané výsledky Buswellovou metodou dle rovnice (10) a tabelovanými hodnotami dle rovnice (17).

Tabulka 3-8 Přehled naměřených údajů z bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí a přehled vypočítaných hodnot

Substrát	2018				2019					
	Listopad		Prosinec		Leden		Únor		Březen	
	ČM	oTS	ČM	oTS	ČM	oTS	ČM	oTS	ČM	oTS
	[t]		[t]		[t]		[t]		[t]	
Kukuř. siláž (m_{KS})	668	210	692	218	916	289	650	205	810	255
Trav. senáž (m_{TRS})	620	184	662	197	430	128	306	91	550	164
Prasečí kejda (m_K)	852	51	730	43	768	46	889	53	686	41
Celkové množství	2 140	446	2 084	458	2 114	462	1 845	349	2 046	460
Spotř. plyn [m^3]	311 902		336 016		335 156		304 175		328 091	
Buswell (BP_{celkB}) [m^3]	319 673		328 287		332 595		251 858		329 770	
Tab. h. (BP_{celkT}) [m^3]	268 232		278 407		281 223		206 770		280 484	

m_{KS} – množství zpracované kukuřičné siláže, m_{TRS} – množství zpracované travní senáže, m_K – množství zpracované prasečí kejdy, BP_{celkB} – výpočet Buswellovou metodou (10), BP_{celkT} – výpočet tabelovanými hodnotami (17)

Výpočtem pomocí Buswellovy metody bylo dosaženo velice podobných výsledků v porovnání s naměřenými daty. Přesných hodnot výpočtem nelze nikdy dosáhnout, protože celý proces je ovlivňován řadou různých faktorů, které model, který byl k výpočtu využit nebere v potaz. Model předpovídá ideální nastavení, i proto byl upraven omezujícím faktorem f ($=80\%$) [4], který je již vysvětlen v kapitole 2.1. Model nebere v úvahu hodnotu sušiny substrátu, hodnotu pH, kvalitu substrátu, teplotu procesu, které mohou výsledky změnit. Výsledky použitých tabelovaných hodnot vyšly méně přesné.



Obr. 3-5 Grafické porovnání výsledků spotřeby plynu v intervalu 5 měsíců

Výsledky výpočtu Buswellovou metodou poskytují pouze maximální potenciál výtěžnosti bioplynu. Dalo by se tedy očekávat, že při výpočtu touto metodou dojde k dosažení vyšších hodnot produkce bioplynu za jednotlivé měsíce. Pouze v měsíci listopad a březen došlo k výsledkům vyšším, než jsou naměřené hodnoty spotřeby plynu. Jedním z důvodů může být zádržná doba, která je v bioplynové stanici ve Valašském Meziříčí až 110 dnů. Zpracovaný substrát se projeví na produkci bioplynu již do 2 dní, ale své maximální hodnoty dosahuje až po několika dnech, kdy se hodnota ustálí a následně klesá, takže v malém množství produkuje až po 110 dnů. To se tedy mohlo na výsledcích v malém poměru projevit a je to jeden z důvodů, proč mohly měsíce prosinec, leden a únor dosáhnout nižší očekávané produkce dle výpočtu než skutečné naměřené hodnoty. Substrát je dovážen od několika různých dodavatelů a tím se i kvalita zpracovávaného materiálu může lišit, prvkové složení jednotlivých druhů substrátu bude mít mírné rozdíly a také hodnoty celkové a organické sušiny budou odlišné.

K největší odchylce při porovnání došlo v únoru. Produkce naměřených hodnot je očekávaně nižší z důvodu kratšího měsíce, ale výsledky výpočtů mohly být ovlivněny téměř polovičním poměrem kejdy oproti ostatním zpracovávaným substrátům. V ostatních měsících je poměr přidávané kejdy oproti únoru podstatně nižší. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4, výtěžnost substrátu kejdy je velice proměnlivá a řada různých literatur uvádí odlišná čísla. Stejně jako u předchozích měsíců mohla být produkce mírně ovlivněna zádržnou dobou.

Tabulka 3-9 Přehled procentuální odlišnosti výpočtových metod oproti naměřeným hodnotám v bioplynové stanici ve Valašském Meziříčí

Procentuální rozdíl					
Výpočtový způsob	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen
Buswell	2,49 %	2,30 %	0,76 %	17,20 %	0,51 %
Tab. hodnoty	14,00 %	17,14 %	16,09 %	32,02 %	14,51 %

Z uvedeného přehledu procentuální odlišnosti lze jednoznačně vidět dosažení poměrně přesných výsledků pomocí Buswellovy metody, kdy kromě únoru došlo nejvýše k 2,5% rozdílu oproti naměřeným hodnotám v BPS. Přesnějších výsledků bylo touto metodou dosaženo i vůči výsledkům tabelovaných hodnot při kterých kromě únoru došlo nejvýše k 17% rozdílu a nejméně k 14% rozdílu. Jelikož únor výrazně zkresluje výsledky přesnosti, bylo vytvořeno srovnání pro výsledky průměrné přesnosti bez únoru i s ním.

Tabulka 3-10 Výsledky průměrné přesnosti metod získané výpočty na případové studii

Průměrná přesnost metod		
Výpočtový způsob	Všechny měsíce	Bez únoru
Buswell	4,65 %	1,51 %
Tab. hodnoty	18,75 %	15,44 %

Při ohledu na všechny porovnávané měsíce došlo Buswellovou v průměru k cca 5% rozdílu od naměřených hodnot a jeví na této případové studii velmi dobré výsledky. Naopak výsledky výpočtu tabelovaných hodnot dosáhly větších rozdílů, kde došlo v průměru k cca 19% rozdílu. Průměrná hodnota procentuálního rozdílu bez únoru pomocí Buswella dosáhla dokonce 1,5 % a tabelované hodnoty 15,5 %. Pro odhad produkce bioplynu by data mohla být užitečným ukazatelem.

4 Závěr

Cílem této práce byl výpočet teoretické produkce bioplynu nejčastěji používaného substrátu ve vybrané bioplynové stanici. Pro splnění tohoto požadavku byla nejdříve provedena rešerše procesu anaerobního rozkladu organických látek ve fermentorech bioplynových stanic, faktorů, které tento proces ovlivňují a také výpočtových metod pro stanovení produkce bioplynu. Došlo k seznámení s Buswellovou metodou, metodou CHSK a MEVM. Pro všechny tyto metody je nutné provedení různých laboratorních analýz anebo využití již naměřených hodnot z různých literárních zdrojů. K výpočtům v případové studii byla vybrána Buswellova metoda, která výsledkem poskytuje maximální potenciál výtěžnosti pro daný substrát, a výpočet pomocí tabelovaných hodnot, které jsou stanovovány výzkumy a uváděny v literatuře.

K výpočtu teoretické produkce bioplynu v bioplynové stanici byla vybrána bioplynová stanice ve Valašském Meziříčí. Nejčastěji využívaným substrátem v ČR je kukuřičná siláž, stejně je tak tomu i ve vybrané bioplynové stanici, kde je ve stejném poměru využívána také travní senáž. Nezbytnou součástí procesu je také využití třetího nejčastějšího substrátu, jímž je v této bioplynové stanici kejda. Bioplynovou stanici pro účel této práce byly poskytnuty fermentační testy 3 vzorků kukuřičné siláže a 2 vzorků travní senáže a údaje o celkovém množství využitého substrátu a spotřeby plynu v motorech za rok 2018 a začátek 2019. K výpočtu produkce bioplynu bylo využito období 5 měsíců, kde byly zpracovány pouze zmiňované nejčastěji využívané substráty.

Pro výpočet pomocí Buswellovy metody, pro kterou je nutná znalost prvkového složení substrátu, byly provedeny palivářské rozbory pro kukuřičnou siláž a travní senáž. Pro prasečí kejdu byla využita tabelovaná hodnota prvkového složení. Výpočtem bylo dosaženo výsledku pro kukuřičnou siláž 721 m³/t oTS, pro travní senáž 700 m³/t oTS a pro prasečí kejdu 767 m³/t oTS. Výsledek hodnoty prasečí kejdy může být mírně zavádějící, jelikož mnoho různých literárních zdrojů uvádí velice rozdílné hodnoty výtěžnosti kejdy a výtěžnost tohoto substrátu je tedy proměnlivá. Tyto hodnoty byly porovnány s výsledky fermentačních testů. Výsledky výpočtu Buswellovou metodou očekávaně dosáhly vyšších hodnot než tabelované hodnoty a výsledky fermentačních testů. Hodnoty kukuřičné siláže se více blížily tabelovaným hodnotám, naopak travní senáž se více blížila fermentačním testům. Pro přesnější výsledky by bylo nutné provést pro každý vzorek substrátu prvkový rozbor, bohužel je tato cesta poměrně finančně a časově náročná.

K dalšímu srovnání bylo využito období 5 měsíců, od listopadu 2018 do února 2019, kde byla zaznamenána množství zpracovaného substrátu a spotřeba plynu za jednotlivé měsíce. Pomocí Buswellovy metody došlo k velice blízkým výsledkům naměřených hodnot, využitím tabelovaných hodnot už výsledky moc přesné nebyly. Odchyly při výpočtu mohly být způsobeny řadou faktorů, které upravená Buswellova metoda nebere v úvahu. K velké výchylce výsledků došlo v únoru 2019, která může být způsobena velkým poměrem zpracované kejdy oproti ostatním měsícům a také může být způsobena zádržnou dobou. Procentuálním porovnáním vůči naměřeným hodnotám v bioplynové stanici bylo dosaženo výsledku, že můžeme očekávat cca 5% rozdílu pomocí Buswellovy metody oproti skutečným výsledkům na této případové studii. Při využití tabelovaných hodnot lze očekávat až 20 % rozdílu. V případě, kdyby se nebral ohled na měsíc únor, který nepřesnými výsledky zkresluje výsledky dat, je průměrná hodnota procentuálního rozdílu pomocí Buswella 1,5 % a pomocí tabelovaných hodnot 15,5 %.

Výhodou tabelovaných hodnot je jejich snadná dostupnost a jednoduchost. Tyto hodnoty tedy mohou sloužit pro hrubý odhad produkce. Každopádně se tabelované hodnoty některých substrátů v různých literaturách liší. Její nevýhodou je nižší přesnost. Pro přesnější výsledky je vhodnější Buswellova metoda, kterou byly dosaženy velmi dobré výsledky. Výpočet je snadný a rychlý. Nevýhodou je obtížnější dostupnost potřebných parametrů pro výpočet.

V práci bylo dosaženo všech stanovených cílů a požadavků. K vylepšení práce a získání přesnějších výsledků by mohlo dojít provedením prvkových rozborů více využívaných substrátů v bioplynové stanici, získáním více fermentačních testů pro porovnání, porovnáním produkce bioplynu v delším období, než které bylo uskutečněno a porovnáním s dalšími typy výpočtových metod. I přes to nelze nikdy dosáhnout naprosto přesných výsledků. Proces anaerobní fermentace je velice komplikovaný a je ovlivňován řadou faktorů. Výpočtové metody se ale jeví jako vhodný prostředek pro odhad stanovení produkce bioplynu.

Využití metod je při technicko–ekonomických výpočtech například v případových studiích a studiích proveditelnosti. Dále může bioplynové stanici pomoci při výběru vhodného substrátu. Výsledky získané touto prací mohou být prospěšné pro získání přehledu o způsobech zjišťování odhadu produkce bioplynu a využití při dalších testování na nových případových studiích

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Atlas energie: fakta a čísla o obnovitelných zdrojích v Evropě* [online]. Praha: Heinrich-Böll-Stiftung e.V., kancelář v Praze, 2018 [cit. 2019-02-1]. ISBN 978-80-88289-05-0. Dostupné z: https://cz.boell.org/sites/default/files/atlas_energie_2018_1.pdf
- [2] Zemědělská bioplynová stanice Bořetice. In: *AgriKomp Czech (Czech Republic)* [online]. 2016 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: www.agrikomp.com/images/cs-CZ/pdf/Nauna_stezka_Boetice_1.pdf
- [3] *Statistical Report of the European Biogas Association 2018: Annual Statistical Report of the European Biogas Association European Overview Chapter*. Brussels, Belgium: EBA 2018.
- [4] ACHINAS, Spyridon a Gerrit Jan Willem EUVERINK. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies* [online]. 2016, 2(3), 143-147 [cit. 2019-02-21]. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.08.001. ISSN 24056537. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405653716300264>
- [5] MD. Preliminary Evaluation of the Potential Biogas Production of Food-Processing Industrial Wastes. *American Journal of Environmental Sciences* [online]. 2012, 8(3), 291-296 [cit. 2019-02-21]. DOI: 10.3844/ajessp.2012.291.296. ISSN 1553-345X. Dostupné z: <http://thescpub.com/abstract/10.3844/ajessp.2012.291.296>.
- [6] PROCHÁZKA, Jindřich a Michal DOHÁNYOS. POROVNÁNÍ METOD PRO ODHAD PRODUKCE BIOPLYNU Z ROSTLINNÝCH SUBSTRÁTŮ. *Paliva*. 2011, 2011(3), 47-52. ISSN 1804-2058.
- [7] STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-732-8090-6.
- [8] DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. 2nd, rev. and expanded ed. Weinheim: Wiley-VCH, c2011. ISBN 978-352-7327-980. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527621705>
- [9] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Prague: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [10] *Průvodce výrobou a využitím bioplynu*. Prague: CZ BIOM, 2009. ISBN 978-80-903777-5-2.
- [11] DOHÁNYOS, Michal. *Anaerobní reaktor není černou skříňkou - teoretické základy anaerobní fermentace* [online]. 2008-11-7 [cit. 2019-03-02] Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>. ISSN: 1801-2655
- [12] CIAHOTNÝ, Karel, Alice PROCHÁZKOVÁ a Veronika VRBOVÁ. Odstraňování sulfanu z bioplynu. 2010, 2, 21–25.
- [13] JELÍNEK, Antonín. *Hospodaření a manipulace s odpady ze zemědělství a venkovských sídel*. Praha: Agrospoj, 2001. Semafor. ISBN 80-239-4234-4.
- [14] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn [online]. 2014. Dostupné z: http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_2014_FINAL.pdf
- [15] RUTZ, Dominik, Rita MERGNER a Rainer JANSSEN. *Sustainable Heat Use of Biogas Plants: A Handbook* [online]. 2. Munchen: WIP Renewable Energies, 2012 [cit. 2018-12-22]. ISBN 978-936338-35-5. Dostupné z: http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2015/03/Handbook-2ed_2015-02-20-cleanversion.pdf
- [16] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-861-6721-6

- [17] Bioplynové stanice. In: *Podohospodárský poradenský systém* [online]. 18.10.2006 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://old.agroporadenstvo.sk/oze/bioplyn/bioplynove_stanice.htm?star?start
- [18] KARA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Evžen PŘIBYL. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. 1. Praha: VÚZT, 2007. ISBN 978-80-86884-28-8.
- [19] PROCHÁZKA, J., M. DOHÁNYOS, M. KAJAN a J. DIVIŠ. *Produkce bioplynu z kukuřice* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/produkce-bioplynu-z-kukurice.html>
- [20] Buswell, A.M., *Anaerobic fermentation*. Div. State Water Survey, 1936. **32**.
- [21] AMON, Thomas, Barbara AMON, Vitaliy KRYVORUCHKO, et al. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology*[online]. 2007, **98**(17), 3204-3212 [cit. 2019-03-5]. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.007. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852406003117>
- [22] *Gasaubeute in Landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt: KTBL, 2005
- [23] HABIG, Clifford a John RYTHER. Some correlations between substrate compositions and biogas yields. *Energy from biomass and wastes VIII, Lake Buena Vista, Florida, USA*. 1984.
- [24] Bioplynová stanice. *Agropodnik, a.s. Valašské Meziříčí* [online]. [cit. 2019-02-29]. Dostupné z: <https://www.agropodnikas.cz/bioplynova-stanice>
- [25] Informace a data získaná z provozního řádu zemědělské bioplynové stanice Valašské Meziříčí.
- [26] *Phyllis2, Database for biomass and waste* [online]. ECN.TNO [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://phyllis.nl/>
- [27] Pig Manure. *Phyllis2, Database for biomass and waste* [online]. ECN.TNO [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#pig>.

Seznam zkratek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
a, b, c, d, e	počet atomů jednotlivých prvků	
ATBMP	upravená teoretická hodnota výtěžku methanu	[ml / g]
BP	bioplyn	
BP _{celkB}	odhad bioplynu za určité období Buswellovou metodou	[m ³]
BP _{celkT}	odhad bioplynu za určité období tabelovanými hodnotami	[m ³]
BP _i	tabelovaná hodnota bioplynu typu substrátu	[m ³ / t]
BPS	bioplynová stanice	
C _{org.}	množství organického uhlíku substrátu	
ČM	čerstvý materiál	
ČR	Česká republika	
f	omezující faktor k převedení na realistické podmínky	
GPS	Ganzpflanzensilage (typ substrátu)	
CHSK	chemická spotřeba kyslíku	
KS	kukuřičná siláž	
MEVM	model energetické hodnoty methanu	
m _i	množství zpracovaného typu substrátu	[t]
m _K	množství zpracované prasečí kejdy	[t]
m _{KS}	množství zpracované kukuřičné siláže	[t]
mm _C	molární hmotnost uhlíku	[g / mol]
mm _H	molární hmotnost vodíku	[g / mol]
mm _N	molární hmotnost dusíku	[g / mol]
mm _O	molární hmotnost kyslíku	[g / mol]
mm _S	molární hmotnost síry	[g / mol]
m _{TRS}	množství zpracované travní senáže	[t]
Nl	normovaný litr	
Nm ³	normovaný metr krychlový	
oTS	organická sušina	[%]
POXČ	průměrné oxidační číslo atomu uhlíku	
TBMP	teoretická hodnota výtěžku methanu	[ml / g]
TBP	teoretická hodnota výtěžnost bioplynu	[m ³ / t]
TBP _i	teoretická výtěžnost bioplynu typu substrátu	[m ³ / t]
TRS	travní senáž	
TS	celková sušina	[%]
TSK	teoretická spotřeba kyslíku	
X ₁ , X ₂ , X ₃ , X ₄	koeficienty pro výpočet metody MEVM	
XF	vláknina	
XL	tuky	
XP	dusíkaté látky	
XX	bezdušíkaté výtažkové látky	
Y _{CH4teor.}	teoretická výtěžnost methanu	[g / g]
γ	stupeň redukovanosti	

Seznam obrázků

Obr. 0-1 Počet bioplynových stanic v evropských státech [3].....	13
Obr. 1-1 Schématický přehled bioplynových technologií [16].....	19
Obr. 1-2 Způsoby dávkování substrátu [16]	20
Obr. 1-3 Schéma bioplynové stanice [17].....	21
Obr. 3-1 Vstupní jímka v BPS Valašské Meziříčí	29
Obr. 3-2 Fermentor a dofermentor v BPS Valašské Meziříčí.....	30
Obr. 3-3 Kogenerační jednotka v BPS Valašské Meziříčí.....	31
Obr. 3-4 Porovnání výtěžností bioplynu pro substráty kukuřičné siláže a travní senáže:	36
Obr. 3-5 Grafické porovnání výsledků spotřeby plynu v intervalu 5 měsíců	37

Seznam tabulek

Tabulka 1-1 Produktivita různých substrátů v procesu anaerobní fermentace [7].....	16
Tabulka 1-2 Průměrné složení bioplynu [13]	17
Tabulka 2-1 Přepočtové koeficienty mezi CH ₄ a CHSK [7]	26
Tabulka 3-1 Prvkové složení kukuřičné siláže a travní senáže	33
Tabulka 3-2 Prvkové složení prasečí kejdy [27]	33
Tabulka 3-3 Částečný výpočet koeficientů dle Buswellovy metody	33
Tabulka 3-4 Výsledky výpočtů dle Buswellovy metody.....	34
Tabulka 3-5 Využité tabelované hodnoty [22]	34
Tabulka 3-6 Výsledky fermentačních testů kukuřičné siláže.....	35
Tabulka 3-7 Výsledky fermentačních testů travní senáže	35
Tabulka 3-8 Přehled naměřených údajů z bioplynové stanice ve Valašském Meziříčí a přehled vypočítaných hodnot	37
Tabulka 3-9 Přehled procentuální odlišnosti výpočtových metod oproti naměřeným hodnotám v bioplynové stanici ve Valašském Meziříčí	38
Tabulka 3-10 Výsledky průměrné přesnosti metod získané výpočty na případové studii	38